



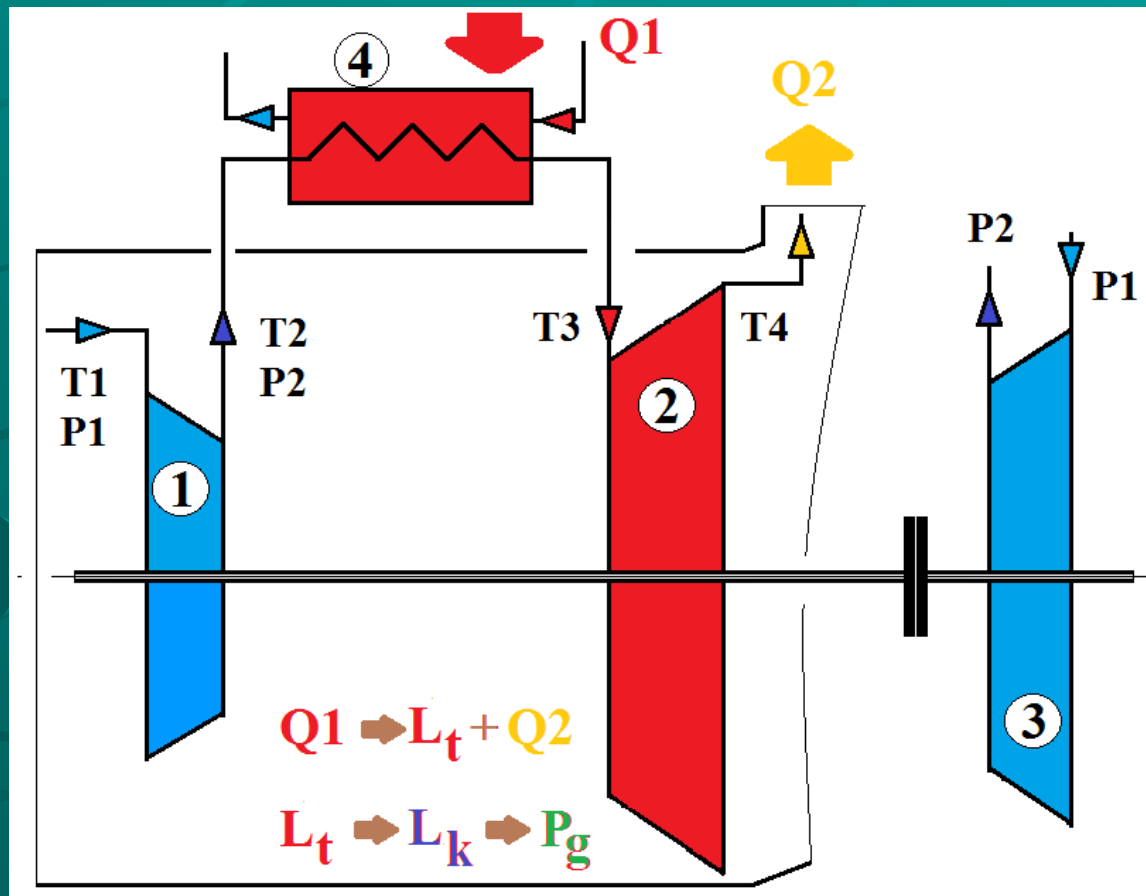
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПРЕССИИ И СЖИЖЕНИЯ ГАЗА ДЛЯ МАЛО И СРЕДНЕТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПГ

ООО НТЦ «Турбогенерация»

СПОСОБЫ КОМПРЕССИИ И СЖИЖЕНИЯ ГАЗОВ

✦ Для того , чтобы получить сжиженный природный газ при атмосферных условиях, его нужно сжать , затем охладить, после чего газ нужно расширить в специальных устройствах, в которых газ , в результате расширения, будет охлаждаться и сжижаться. Также получить сжиженный газ возможно, используя внешний контур охлаждения. Наиболее распространённые сегодня системы компрессии газов выполнены на основе газотурбинных двигателей и турбокомпрессоров.

ТУРБОКОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С ГАЗОТУРБИННЫМ ПРИВОДОМ



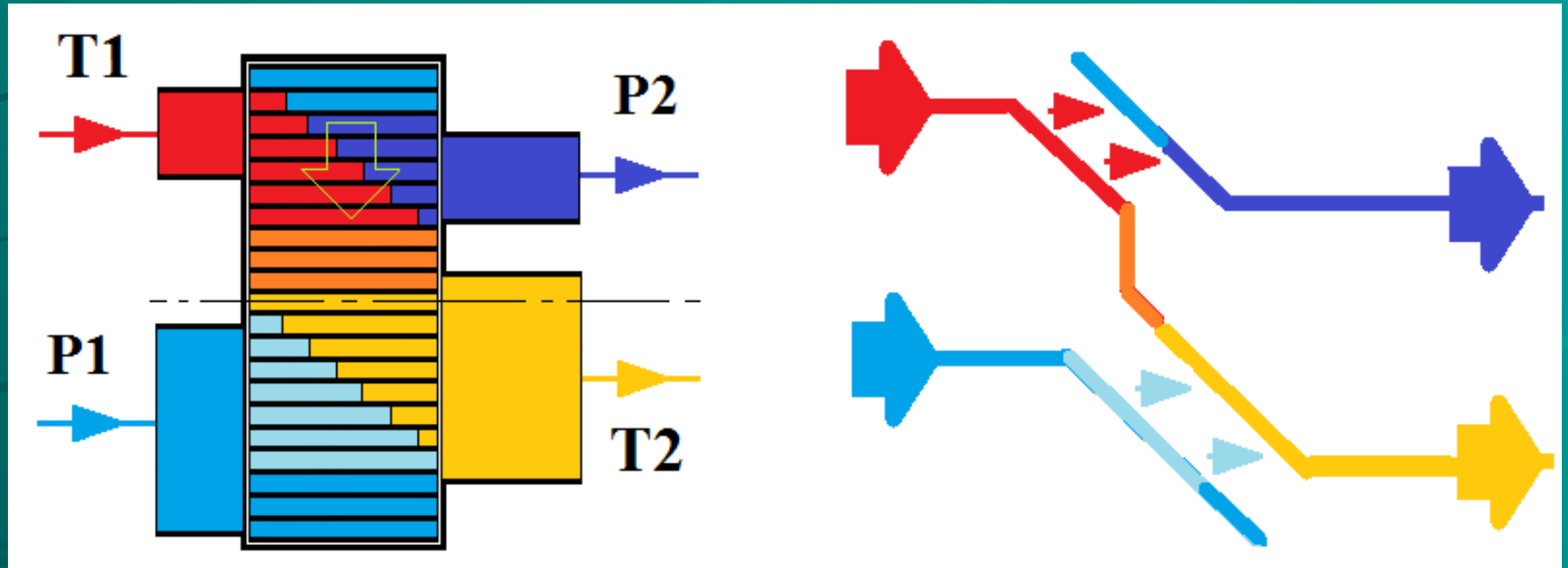
1. Компрессор ГТД, 2. Турбина ГТД, 3. Компрессор сжимаемого газа, 4. Нагреватель

✦ Принцип работы: Воздух сжимается в компрессоре газотурбинного двигателя 1, после чего внутренняя его энергия увеличивается за счёт подвода тепла в нагревателе 4. Далее, горячий воздух расширяется в газовой турбине 2, в которой тепловая энергия преобразуется в механическую энергию - в энергию вращения вала. Установленные на валу турбины компрессор турбины 1 и компрессор сжимаемого газа 3 преобразуют механическую энергию в энергию сжатого воздуха и любого другого газа. КПД газотурбинного двигателя зависит от температуры и давления газа перед турбиной, и от эффективности узлов, из которых он состоит. КПД компрессора современных ГТД составляет 86%..... 90%, а КПД турбины- 89%-93%.

ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГИЮ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

- ◆ Тепловую энергию, например, полученную при сжигании углеводородного топлива, возможно и напрямую, без использования промежуточных процессов, преобразовать в энергию давления газа. Для этого следует применить специальные устройства – обменники давлением. Как правило, в обменниках давлением горячий газ большего давления и меньшей массы, повышает давление (обменивается давлением) газа с меньшей температурой, и с большей массой. Чем больше тепла удастся подвести к сжимающему газу – тем большую массу холодного (сжимаемого) газа можно будет сжать в таком устройстве. Наиболее распространённым, отработанным и известным обменником давления является волновой обменник давления – волновой ротор (WR).

ВОЛНОВОЙ ОБМЕННИК ДАВЛЕНИЯ (ВОЛНОВОЙ РОТОР)

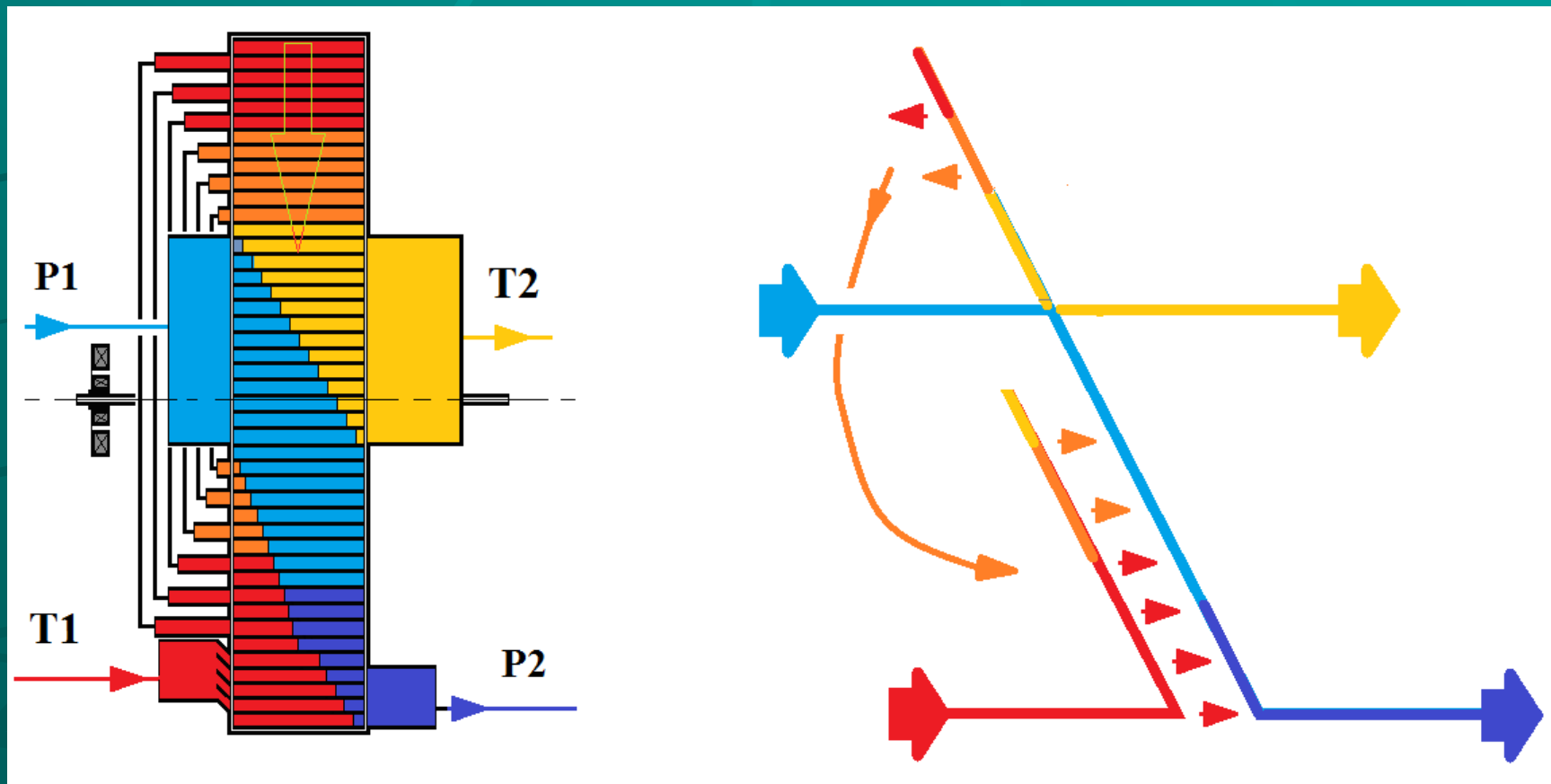


Принцип работы – обмен давлением при непосредственном контакте между сжимаемой и сжимающей средами с помощью генерации волн сжатия- разрежения в каналах ротора, при прохождении каналов мимо портов, выполненных в корпусе.

ПРОБЛЕМЫ ВОЛНОВОГО РОТОРА

- ✦ 1. Трудности продувки в части низкого давления. Продувка осуществляется за счёт волн разрежения, создаваемых в результате использования остаточной энергии сжимающей среды.
 - ✦ 2. Сильное влияние величины зазоров на эффективность процессов.
 - ✦ 3. Значительное рассогласование волновых процессов на нерасчётных режимах работы, вплоть до полной потери работоспособности.
 - ✦ 4. Потери энергии в результате образования сильных ударных волн.
 - ✦ 5. Оптимальная степень повышения давления: 1.5....2.5.
- ✦ КПД 50%=75%

КАСКАДНЫЙ ОБМЕННИК ДАВЛЕНИЕМ



- ✦ Принцип работы – последовательное ступенчатое сжатие сжимаемой среды низкого давления, в результате непосредственного контакта со сжимающей средой высокого давления, при прохождении каналов ротора мимо портов, выполненных в статоре.

ПРЕИМУЩЕСТВА КАСКАДНОГО ОБМЕННИКА ДАВЛЕНИЕМ

- ✦ 1. Продувка осуществляется с помощью высокоэффективного вентилятора
- ✦ 2. Уменьшено влияние зазоров на эффективность, за счёт ряда перепускных каналов, расположенных между портами высокого и низкого давления.
- ✦ 3. Ступенчатый (каскадный) обмен давлением между сжимающей и сжимаемой средами, что препятствует образованию сильных ударных волн
- ✦ 4. Рекуперация остаточной энергии давления сжимающей среды, которая используется, далее, для предварительного сжатия сжимаемой среды
- ✦ 5. Оптимальная степень повышения давления: 3....4
- ✦ КПД 80%-90%

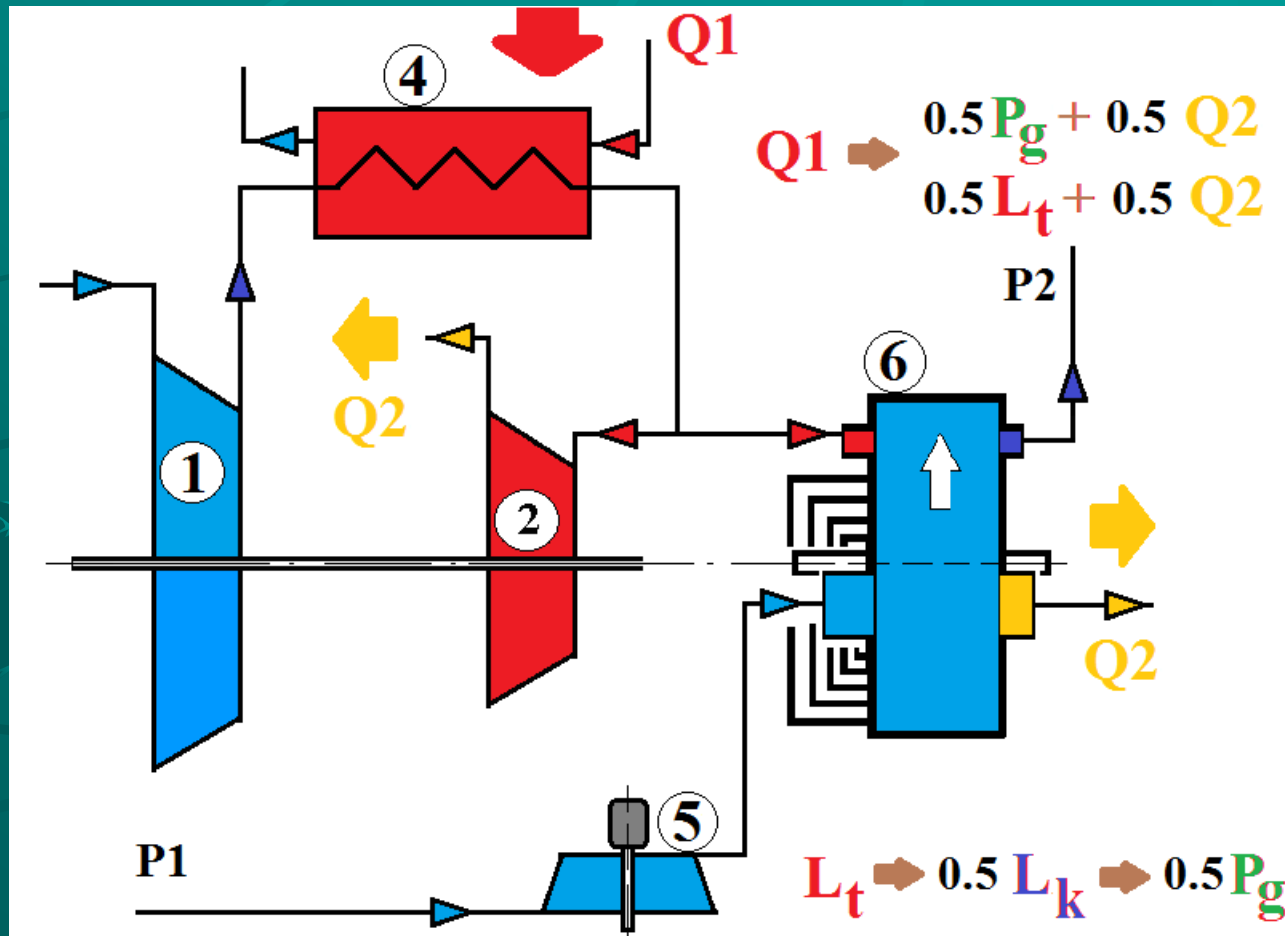
✦ Если сравнивать конструкции волнового ротора и каскадного обменника давлением, то видно, что волновой ротор не рассчитан на высокие степени расширения-сжатия в нём газа, так как подвод сжимающего газа сопряжён с подводом, сжимаемого газа, напрямую, через зазоры между ротором и статором. В каскадном обменнике давлением между подводом газа высокого давления и подводом газа низкого давления выполнены промежуточные ступни расширения-сжатия. Так как функционально оба обменника давлением представляют собой аналоги турбокомпрессора, то волновой ротор можно сравнить с одноступенчатым турбокомпрессором, а каскадный обменник давлением – с многоступенчатым турбокомпрессором.

✦ С учётом того, что за последние 70 лет на разработку, исследования и производство волнового ротора потрачены десятки млрд. долларов (исследования Роллс-Ройс, Дженерал Электрик, НАСА, АБВ – Альстом, Мазда, десятков институтов и университетов по всему миру), а на исследования каскадного обменника давлением потрачены несравнимо меньшие ресурсы, то очень странным выглядит ситуация, когда недостатки волнового ротора, которые разочаровали его исследователей, переносятся на каскадный обменник давлением. Это равнозначно тому, что вы отказываетесь от применения многоступенчатого турбокомпрессора, потому, что в одноступенчатом турбокомпрессоре не можете эффективно реализовать высокие перепады давления. Поэтому каскадный обменник давлением – как устройство прямого многоступенчатого преобразования тепловой энергии в давление сжимаемого газа имеет колоссальный потенциал применения в энергетике, в том числе, в системах компрессии и сжижения природного газа.

КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С КАСКАДНЫМ ТЕРМОКОМПРЕССОРОМ

Предлагается, на основе каскадного обменника давлением Крайнюка А.И. , как более совершенного устройства , чем классический волновой ротор, разработать ряд систем компрессии газа с использованием тепловой , например бросовой тепловой энергии из выхлопа газотурбинного двигателя. Такая схема будет наиболее эффективна , так как высокую температуру , полученную при сгорании топлива эффективнее использовать в ГТД для привода, например турбокомпрессора, а остаточное тепло, которое уже не сможет расплавить теплообменник – напрямую преобразовать в энергию давления сжимаемого газа, в компрессорной установке с каскадным термокомпрессором.

КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С КАСКАДНЫМ ТЕРМОКОМПРЕССОРОМ

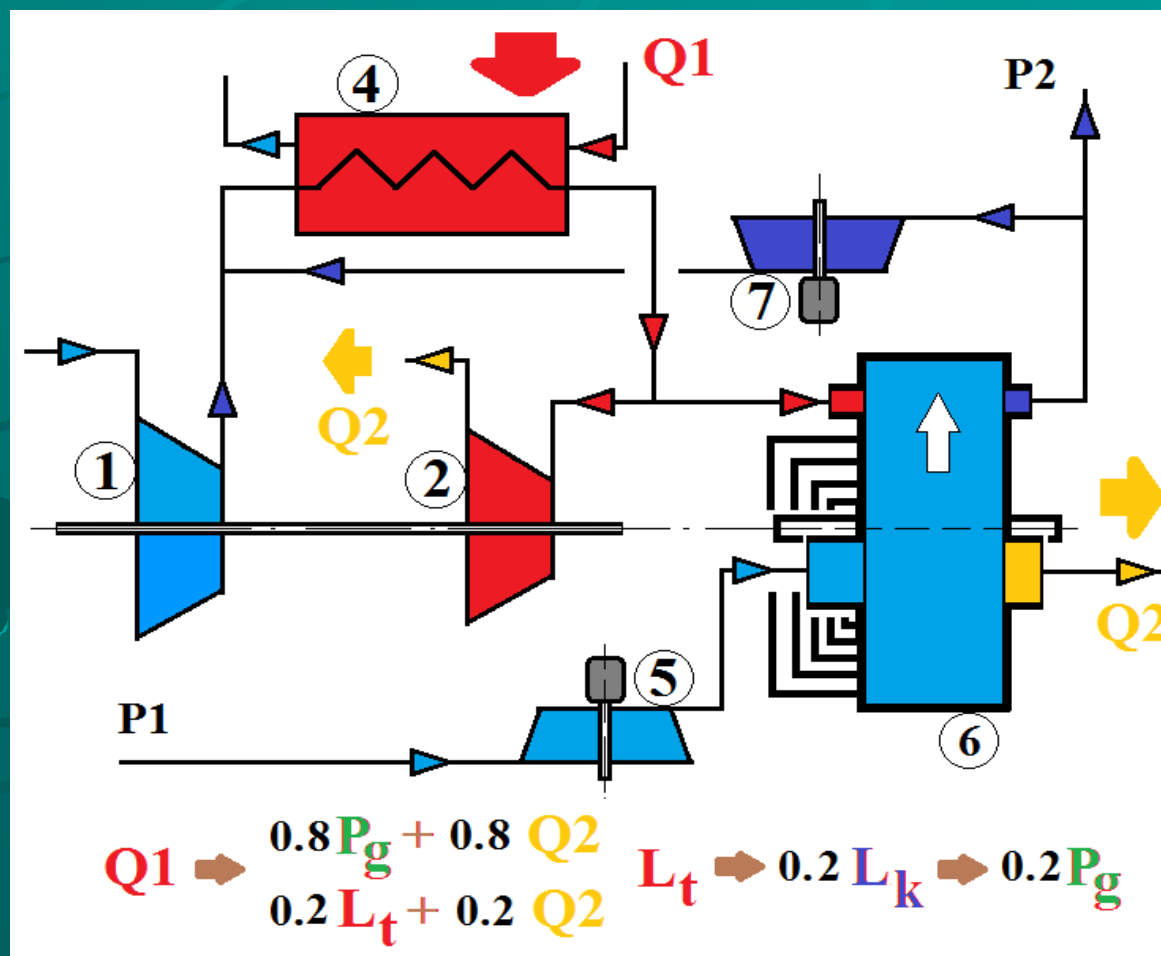


1. Компрессор , 2. Турбина, 4. Нагреватель, 5. Продувочный вентилятор,
6. Каскадный термокомпрессор.

КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С КАСКАДНЫМ ТЕРМОКОМПРЕССОРОМ

- ✦ Принцип работы: Газ сжимается в компрессоре 1, после чего внутренняя его энергия (объём) увеличивается за счёт подвода тепла в нагревателе 4. Далее, горячий газ разделяется на две части. Одна часть газа расширяется в газовой турбине 2, преобразуя часть тепловой энергии в механическую энергию. Установленный на валу турбины 2 компрессор 1 преобразует механическую энергию в энергию сжатого газа. Другая часть, полученной сжатым в компрессоре 1 газом тепловой энергии Q_1 , напрямую преобразуется в каскадном термокомпрессоре 6, в энергию сжатого газа, а неиспользованная низкопотенциальная тепловая энергия Q_2 , удаляется из цикла.

КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С КАСКАДНЫМ ТЕРМОКОМПРЕССОРОМ ВАРИАНТ 2

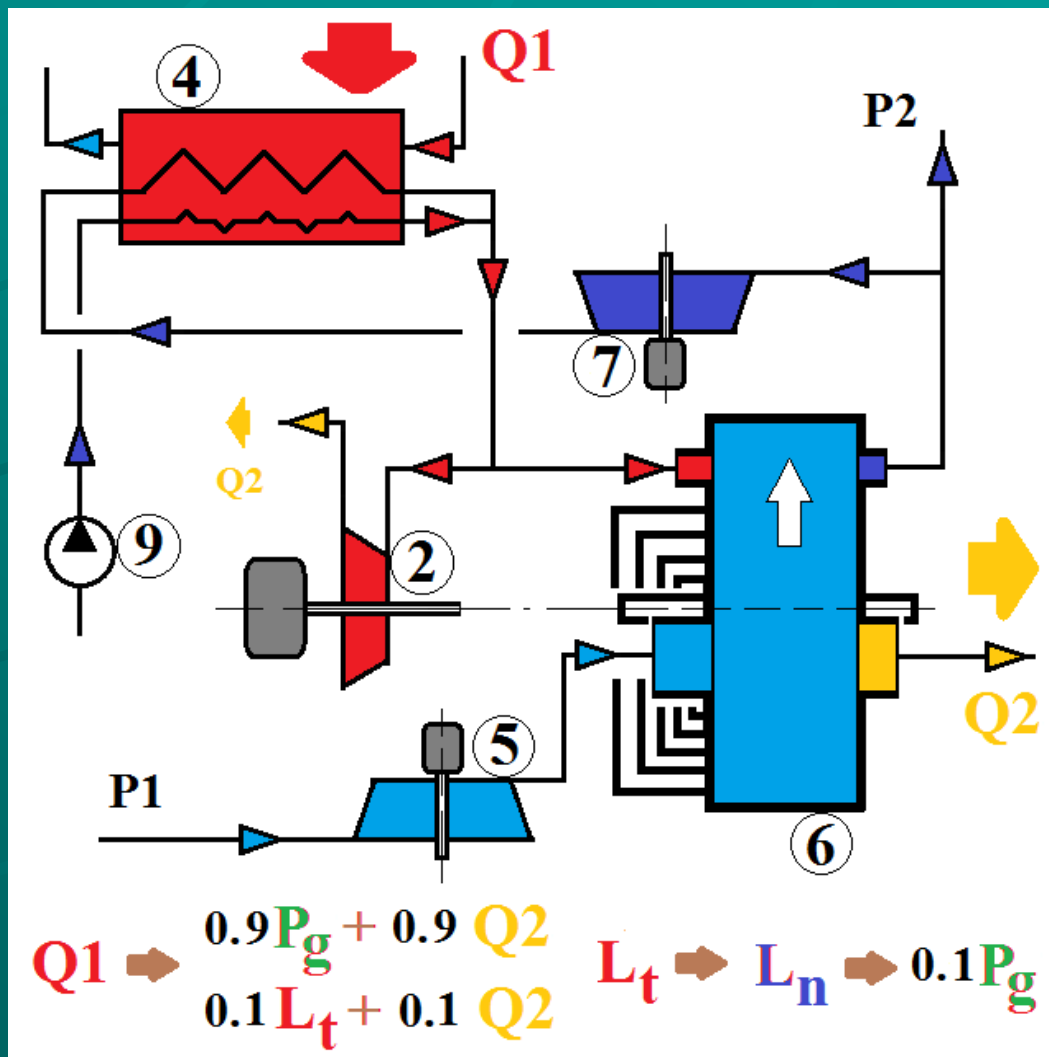


1. Компрессор, 2. Турбина, 4. Нагреватель, 5. Продувочный вентилятор, 6. Каскадный термокомпрессор, 7. Циркуляционный вентилятор.

❖ В рабочий цикл компрессорной установки с термокомпрессором добавляется циркуляционный вентилятор 7, посредством которого часть, сжатого в термокомпрессоре (с высоким КПД) газа, направляется, вместе с потоком газа из компрессора 1, в нагреватель 4, после чего, объединённое сжимающее рабочее тело, расширяется в турбине 2 и, в каскадном термокомпрессоре 6. При этом габариты каскадного термокомпрессора несколько увеличиваются так, как часть, сжатого в нём газа, циркулирует в системе без использования компрессора 1. При этом потребная мощность турбины 2 и компрессора 1 снижается до 20%, а 80% газа сжимается в термокомпрессоре, за счёт прямого преобразования располагаемой тепловой энергии в сжатый газ, то есть газ сжимается с меньшими потерями, что увеличивает КПД компрессорной установки.

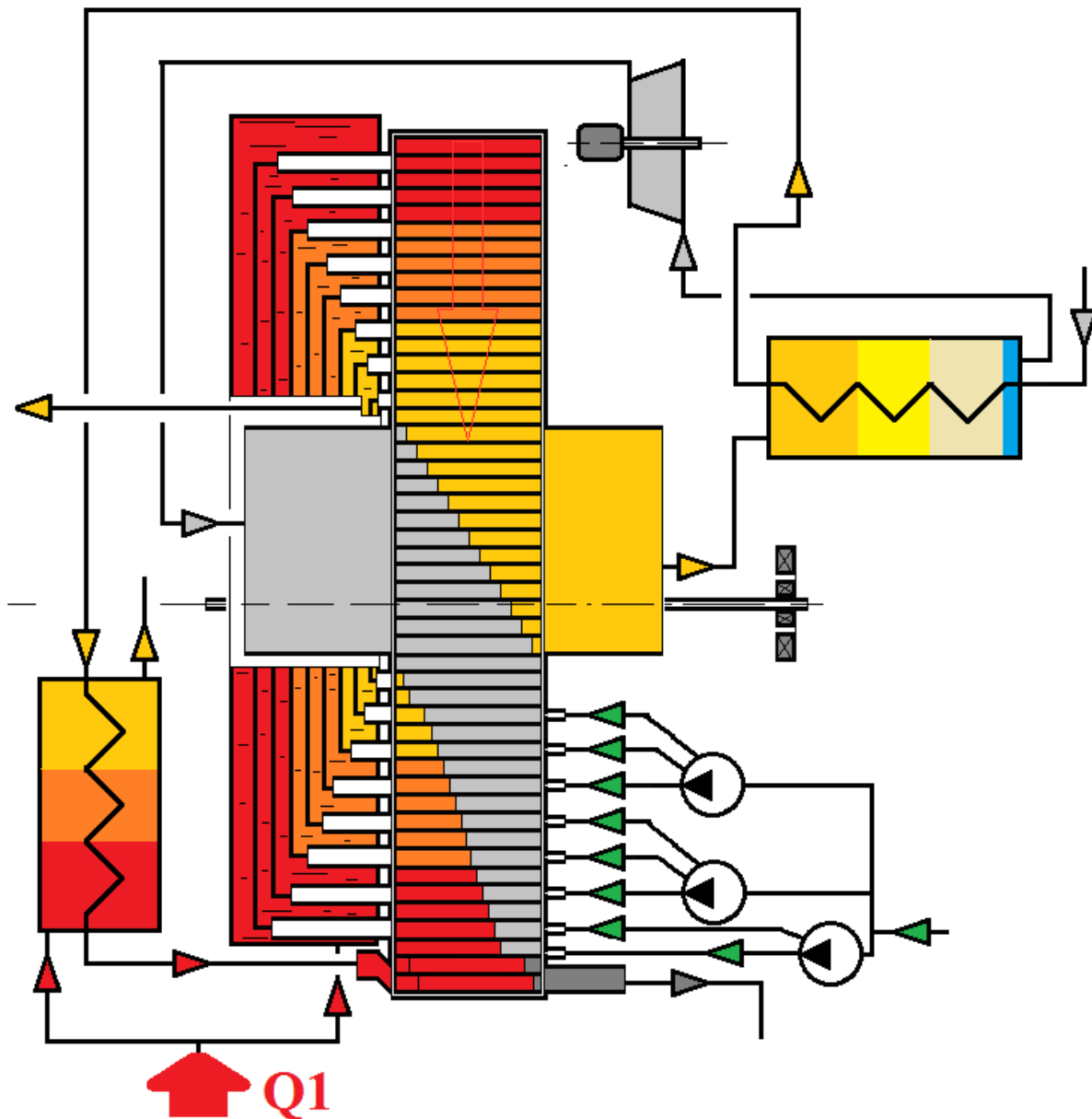
КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА С КАСКАДНЫМ ТЕРМОКОМПРЕССОРОМ ВАРИАНТ 3

- ✦ 2. Турбина,
- ✦ 4. Нагреватель,
- ✦ 5. Продувочный вентилятор,
- ✦ 6. Каскадный термокомпрессор,
- ✦ 7. Циркуляционный вентилятор,
- ✦ 9. Насос.



✦ Возможно вообще отказаться от компрессора 1 , а газ сжимать посредством насоса 9. Для этого в качестве части сжимающего рабочего тела необходимо использовать газ , который при атмосферной температуре конденсируется при разумном давлении. Например пентан, пропан, этан, диоксид углерода и.т.п.. Этот вспомогательный газ , с определённым давлением, нагнетается насосом в нагреватель 4, где испаряется . Далее, он объединяется, со сжатым в термокомпрессоре, другим совместимым с ним газом , например с метаном, азотом, воздухом и.т.п., также нагретом в нагревателе 4. После чего , объединённое сжимающее рабочее тело расширяется в каскадном термокомпрессоре 6. После охлаждения , сжатого в термокомпрессоре газа , этот вспомогательный газ конденсируется и возвращается на вход насоса 9, после чего цикл повторяется. Работа насоса значительно меньше работы компрессора по сжатию газа , поэтому уже 90%, располагаемой тепловой энергии, возможно напрямую преобразовать в энергию сжатого газа , а 10% преобразовать в работу на валу турбины 2 , например, для выработки электроэнергии.

КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ КАСКАДНЫЙ ТЕРМОКОМПРЕССОР

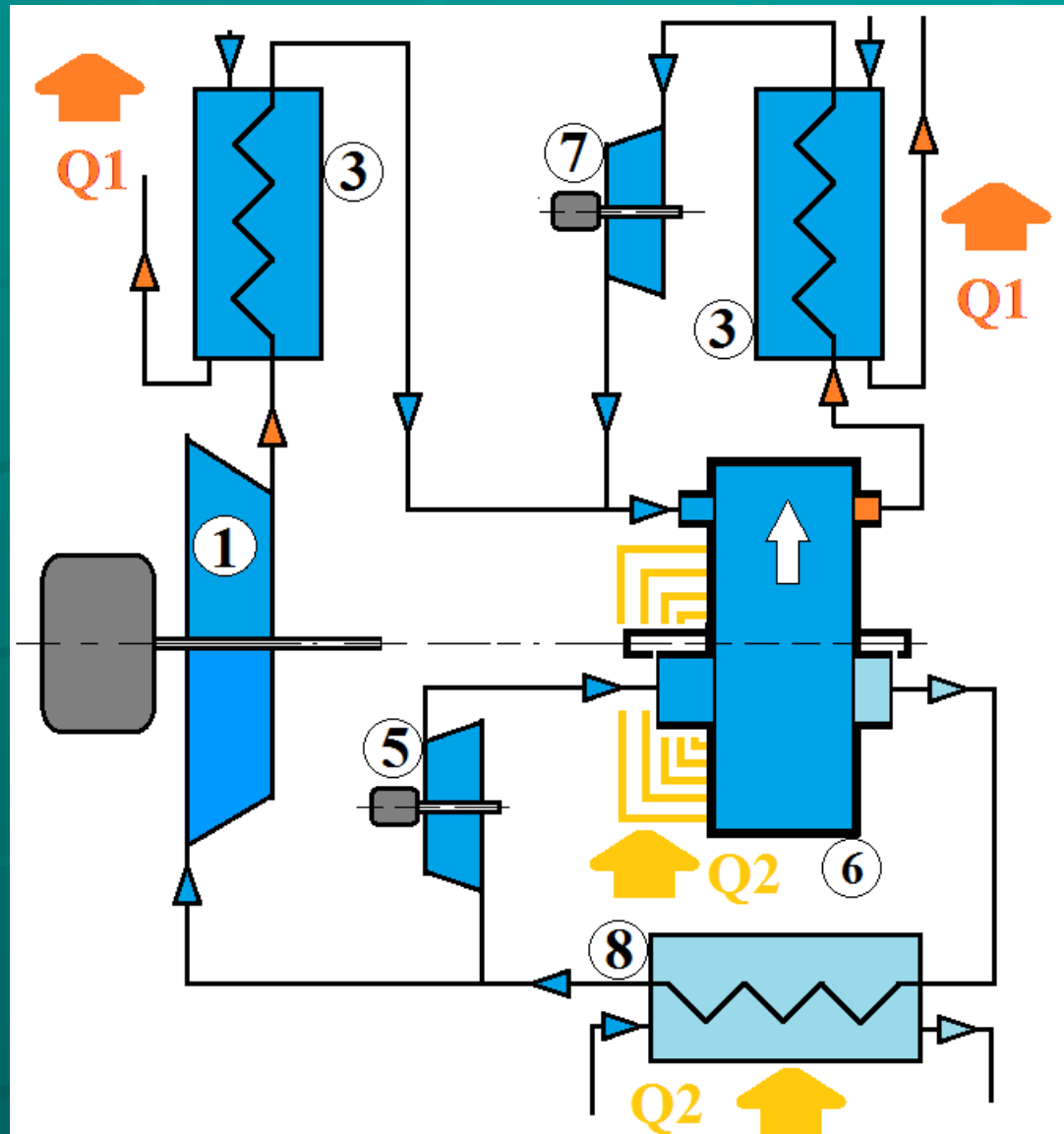


✦ Дополнительно, значительно увеличить эффективность процессов расширения –сжатия , возможно в квазиизотермическом каскадном термокомпрессоре при подводе тепла к сжимающему газу, в процессе его расширения, в каскадном термокомпрессоре , и в результате отвода тепла, при сжатии в нём, сжимаемого газа. При этом, процесс расширения рабочего тела в каскадном термокомпрессоре происходит при постоянном объёме ($v = \text{const.}$) и сопровождается ростом давления, сжимающего газа. А процесс сжатия газа , с отводом тепла при постоянном объёме требует меньших затрат энергии, чем тот же процесс , но при постоянном давлении ($p = \text{const.}$). Рост эффективности процессов происходит за счёт снижения расхода, сжимающего рабочего тела, на единицу сжимаемой среды.



ХОЛОДИЛЬНАЯ РЕФРИЖЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА С КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКИМ КАСКАДНЫМ ДЕТАНДЕР- КОМПРЕССОРОМ

- ✦ 1. Компрессор хладагента.
- ✦ 3. Атмосферный охладитель.
- ✦ 5. Продувочный вентилятор,
- ✦ 6. Квазиизотермический каскадный детандер-компрессор,
- ✦ 7. Циркуляционный вентилятор.



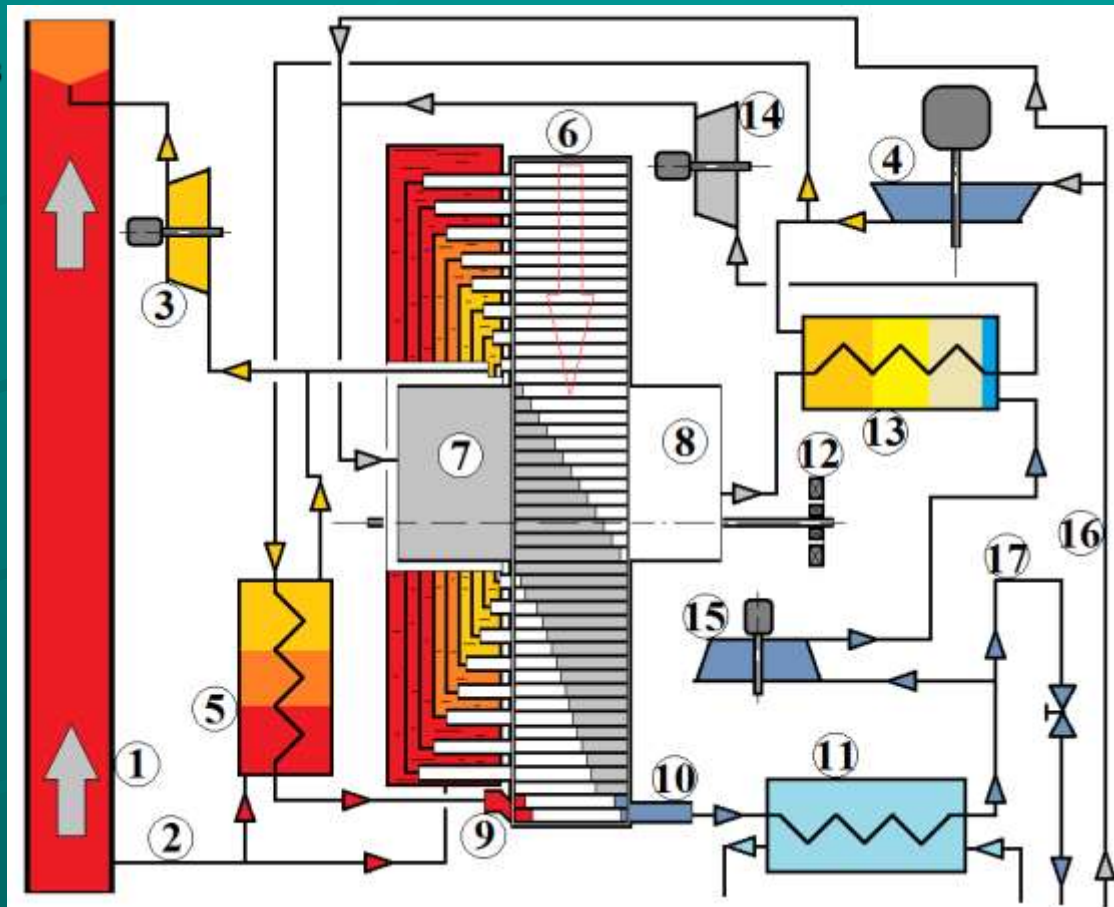
- ✦ В отличие от каскадного термокомпрессора , в котором к сжимающему газу подводится тепло, чтобы получить , при его расширении , максимум работы, по сжатию сжимаемого газа , перед подачей в каскадный детандер- компрессор, от сжимающего рабочего тела, наоборот - тепло отводится, чтобы получить при его расширении, в первую очередь - холод , а в дополнение - работу по сжатию газа.

Преимущества

- ✦ -Позволяет уменьшить работу компрессора по сжатию газа.
- ✦ -Большая оптимальная степень расширения –сжатия газа в каскадном детандер - компрессоре: 3-10 (зависит от давления , создаваемого компрессором) .
- ✦ - Возможно использование каскадного детандер -компрессора на частичных режимах работы, в виду меньшей чувствительности (благодаря наличию перепускных каналов) к отклонению от оптимального режима,
- ✦ -Наличие перепускных каналов снижает перетечки газа через зазоры между корпусом и ротором , что повышает КПД.
- ✦ - В виду простоты конструкции и малых оборотов вращения ротора каскадного детандер -компрессора , ожидается , что стоимость, выполненных на его основе генераторов холода, будет достаточно низкой.

Термокомпрессорная часть установки сжижения природного газа с азотным рефрижераторным циклом

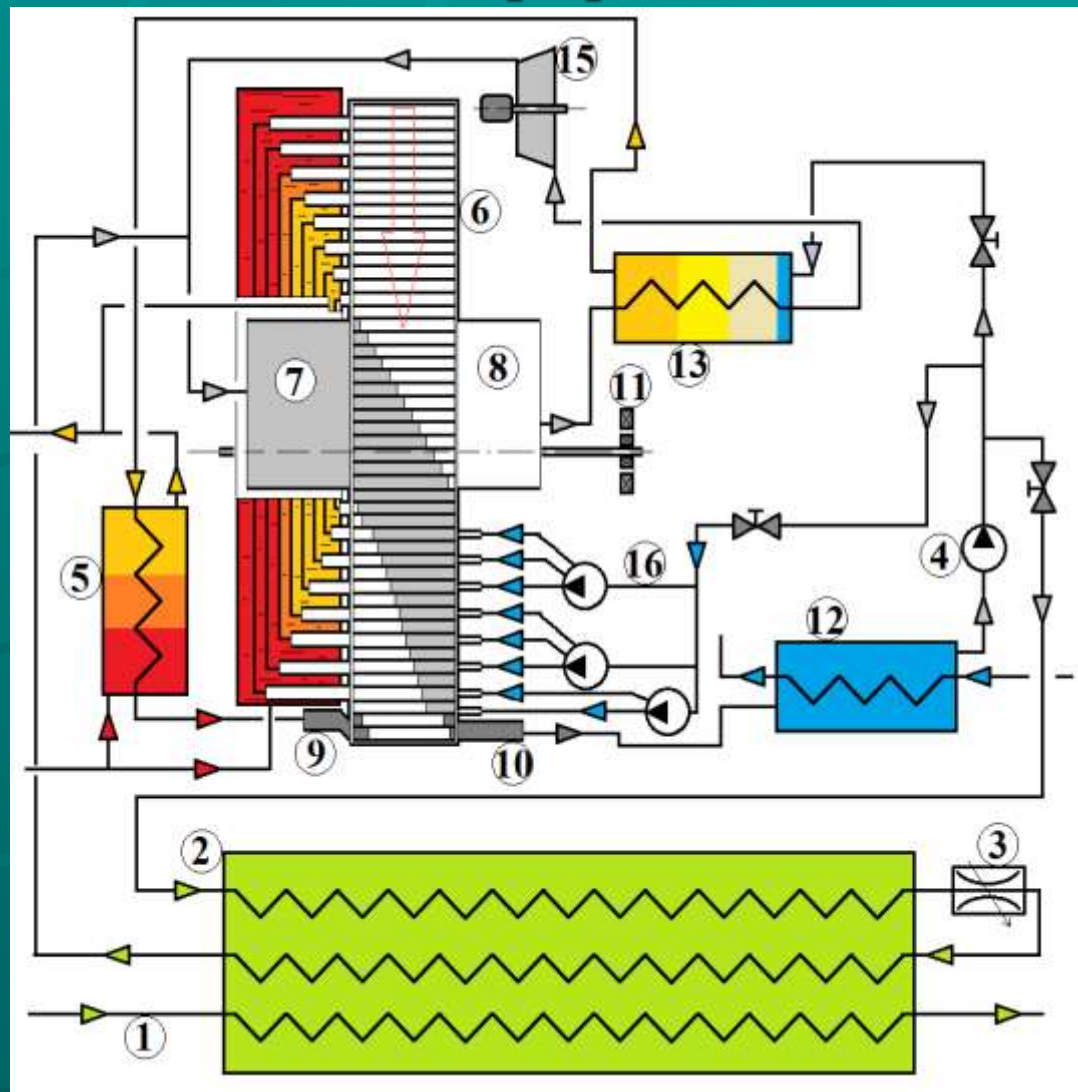
1. Выхлопная труба ГТУ, 2. Горячие продукты сгорания, 3. Вентилятор – дымосос (отвод холодных продуктов сгорания), 4. Компрессор высокого давления, 5. Нагреватель хладагента (воздух, азот), 6. Каскадный термокомпрессор, 7. Порт подвода хладагента низкого давления, 8. Порт отвода хладагента низкого давления, 9. Порт подвода хладагента высокого давления, 10. Порт отвода хладагента высокого давления, 11. Охладитель, 12. Двигатель системы регулирования оборотов ротора термокомпрессора, 13. Рекуперативный нагреватель, 14. Продувочный вентилятор, 15. Циркуляционный вентилятор, 16. Подвод хладагента низкого давления (воздух, азот), 17. Отвод хладагента высокого давления (воздух, азот).



✦ При пуске термокомпрессора 6 азотный компрессор 4 закачивает газ в термокомпрессор 6 (фаза накачки) и пока давление газа не достигнет заданного уровня, выпускная магистраль 10, сжатого в термокомпрессоре 6 газа перекрыта. Подвод тепла к рабочему телу в нагревателе происходит при постоянном давлении ($p = \text{const.}$). В квазиизотермическом каскадном термокомпрессоре 6 часть тепла, в процессе расширения рабочего тела, подводится при постоянном объёме ($v = \text{const.}$). Производительность каскадного термокомпрессора зависит от массового расхода сжимающего газа за единицу времени, при определённом его объёме, который напрямую зависит от температуры газа. То есть, чем до более высокой температуры нагреется сжимающий газ, при подводе к нему тепла в нагревателе 5, тем больше будет объем сжимающего газа, в следствии чего большую массу, сжимаемого газа будет возможно сжать.

Каскадный квазиизотермический термокомпрессор в пропановом или этановом цикле предварительного парокомпрессионного охлаждения природного газа

- 1. Подвод сырья газа,
- 2. Теплообменник предварительного охлаждения,
- 3. Дроссельный клапан,
- 4. Циркуляционный насос,
- 5. Нагреватель хладагента (пропан, этан),
- 6. Каскадный термокомпрессор,
- 7. Порт подвода рабочего тела низкого давления,
- 8. Порт отвода рабочего тела низкого давления,
- 9. Порт подвода рабочего тела высокого давления,
- 10. Порт отвода рабочего тела высокого давления,
- 11. Устройство регулирования оборотов ротора,
- 12. Охладитель- конденсатор,
- 13. Рекуперативный нагреватель- испаритель,
- 15. Циркуляционный вентилятор рабочего тела низкого давления,
- 16. Система впрыска охлаждающей жидкости (пропан, этан).



✦ Неиспользованное в азотном термокомпрессоре тепло (температурой 300С и ниже), возможно задействовать для охлаждения сжижаемого газа, в отдельном, парокompрессионном контуре предварительного охлаждения, что значительно повышает производительность установок получения СПГ. В контуре предварительного охлаждения ПГ, другой каскадный термокомпрессор используется для компрессии легкокипящих хладагентов: искусственных или природных, например - пропана, этана, или смесей подходящих хладагентов. В таком термокомпрессоре возможно применить квазиизотермический каскадный обменник давлением, с подводом тепла при расширении рабочего тела и отводом тепла при сжатии хладагента. Что позволит эффективно использовать тепловую энергию от уровня, например, 300С и вплоть до температуры окружающей среды.

Выводы и рекомендации:

- ✦ Предложена установка сжижения природного газа, включающая каскадный термокомпрессор, работающий на бросовой теплоте из выхлопа ГТУ. Термокомпрессор позволяет напрямую, без промежуточных процессов, преобразовывать тепловую энергию в энергию давления сжимаемого газа. Рабочим телом термокомпрессора является азот, который после сжатия и охлаждения, уже как хладагент расширяется в азотном рефрижераторном цикле, при этом обратным потоком в теплообменниках охлаждает и сжижает природный газ. После чего азот вновь поступает в термокомпрессор и сжимается. Данная технология обладает высокой эффективностью, при простоте технологической линии производства СПГ и позволяет, за счёт использования бросового тела, вырабатывать от 1 тонны до 200 тонн в час СПГ, в установке с одним каскадным термокомпрессором.

Выводы и рекомендации:

- ✦ Также предложено использовать пропан или этан, в качестве рабочего тела и хладагента, в каскадном термокомпрессоре, работающем на более низком температурном уровне, например, от 300С и ниже . Это позволяет сжимать газ в термокомпрессоре насосом и организовать парокompрессионный цикл предварительного охлаждения ПГ, чтобы повысить эффективность азотного рефрижераторного цикла. При этом, за счёт более глубокой утилизации тепла из выхлопных газов ГТУ , увеличивается производительность линии производства СПГ. Помимо этого, использование пропана или этана позволяет организовать квазиизотермические процессы сжатия рабочего тела в каскадном термокомпрессоре и , например, хладагента в каскадном детандер- компрессоре , что значительно увеличивает эффективность установки сжижения ПГ.

Спасибо за внимание.

Костюков В.Н. Тел. +7 844 2 98 08 91.

ООО НТЦ «Турбогенерация»



Turbogeneration@list.ru

*The Scientific-Technical Center
«Turbogeneration» Limited Liability Company.*